736 *A*MeV ^{28}Si 与 C 靶作用弹核碎片发射角研究*

党英华[1,2]，李俊生[1,†]，康静潇[1]，王瑛[1]，杨晓璐[1]，

刘啸宇[1]，李蓉[1]，张东海[1,†]

（1. 山西师范大学现代物理研究所，太原 030031；

2. 山西师范大学现代文理学院转设筹备处，临汾 041000）

摘要: 利用 CR-39 探测器、HSP-1000 高速成像显微镜和 PitFit 径迹分析软件研究了中高能 ^{28}Si 与 C 靶反应产生的弹核碎片角分布。通过束流照射、化学蚀刻以及径迹重建等实验过程，给出了能量为 736 *A*MeV ^{28}Si 与 C 靶反应弹核碎片发射角分布的最新实验结果，并与能量在 800 *A*MeV 和 775 *A*MeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应产生的弹核碎片发射角分布进行比较。结果表明，弹核碎片发射角的角分布平均值和宽度大于 ^{28}Si 束流粒子的散射角；大多数弹核碎片发射角小于 2.0 度，很少有发射角大于 2.0 度；不同电荷数 *Z* 的弹核碎片发射角平均值范围在 1.0 度以内，其角分布平均值和宽度随碎片电荷数 *Z* 的增加总体呈现减小的趋势。

关键词：重离子碰撞；碎裂；发射角；角度分布

中图分类号：O571.1; O571.6　　　**文献标志码**：A　　　doi：

1. 引言

重离子碰撞为在特殊条件下研究核物质提供了独特的机会。在能量从几百 *A*MeV 到几十 *A*GeV 的中高能区，核碎裂是核物理、天体物理、放射生物学和应用物理学等领域中重要的研究内容。探索中高能核-核碰撞的相互作用机制，对于评估航天器设备的辐射损伤，计算银河系宇宙射线(GCR)中重离子在星际介质中的传播，了解宇宙射线的组成等都具有重要意义[1-3]。当银河系宇宙射线中的重离子在自由空间的剂量被绘制成原子序数的函数时，硅与铁、氧、碳和镁等元素一样突出，并且硅对自由空间剂量当量的贡献仅次于铁[4]，大多是铁和其它重粒子相互作用的碎裂产物。电荷变化截面有助于阐明重离子碰撞中的反应机制，而精确的截面数据在放射生物学和放射治疗中也至关重要。如今，重离子已被用于放射治疗，但是弹核碎裂会使癌症治疗计划复杂化，因为在治疗过程中产生的弹核碎片的角度分布要比束流粒子大。因此，不同能量硅作用于不同靶材上产生的碎片截面和碎片发射角信息都非常重要。

收稿日期：　　　**修改日期**：

基金项目：国家自然科学基金项目（11075100，11347198，11565001）；山西省自然科学基金项目（2011011001-2，202203021212396）

作者简介：党英华（1993—），男，山西临汾人，博士研究生在读，粒子物理与原子核物理专业；E-mail: sxdangyh@163.com

[†]**通信作者**：李俊生（1977－），男，河北三河人，教授，从事粒子物理与原子核物理研究；E-mail: lijs@sxnu.edu.cn

张东海（1964－），男，山西五寨人，教授，从事中高能核物理实验方面的研究；E-mail: zhangdh@sxnu.edu.cn

目前已有许多研究组在相对论能量下对硅作用于不同靶材产生的截面进行了实验研究[4-17]，这些实验数据为进一步研究重离子碰撞提供了理想的数据库。在理论上，主要采用 NUCFRG2[18]、PHITS 算法[19]、Bradt-Peters 半经验公式[20]等对总截面进行计算，而 EPAX3[21]、修正的 EPAX2[22]、FRACS[23]等经验参数化模型则是在已有实验数据基础上对模型的参数不断进行优化而建立起来，从而对弹核碎片分截面进行模拟计算。

弹核离子与靶核原子碰撞后，产生的弹核碎片会以更大的角度发射，这会使辐射照射区域显著增加。因此，碎片发射角的确定对肿瘤治疗和空间辐射防护非常重要，而目前关于碎片发射角的研究还不够充分。在角度测量方面，有多种探测器和测量技术被用于测量弹核碎片的发射角，包括核乳胶[24]、闪烁体探测器[25]、硅探测器[25]和 CR-39 固体核径迹探测器[16,26-33]等。其中半经验模型 FRANG[34]、改进的 M-FRANG 模型[28]、PHITS 系统[35]等可对弹核碎片发射角进行计算，但不同模型之间的预测结果存在一定的差异[36]。与其他探测器相比，CR-39 固体核径迹探测器具有良好的电荷分辨率和非常精确的位置精度[36]，同时能够探测到大角度的粒子散射[28]，可作为研究碎片发射角分布的有效探测器。实验上，利用 CR-39 固体核径迹探测器已经测量了一些实验数据[16,26-33]，但关于硅作用于不同靶产生碎片发射角的研究相对较少，需要更多的实验数据来系统地概述反应过程。

本文研究了能量在 736 *A*MeV 下 ^{28}Si 与 C 靶作用碎裂产生的弹核碎片发射角分布。

2. 实验过程

本实验中 ^{28}Si 束流与 C 靶反应是在日本国立放射线医学综合研究所(NIRS)的重离子医学加速器(HIMAC)中进行的，入射弹核的束流能量为 800 *A*MeV，弹核束流密度为 1250 个离子/平方厘米。束流照射的结构如图 1 所示，CR-39 探测器被定位在靶材的前后，弹核束流与靶核碰撞后将碎裂为大小不同的弹核碎片。靶和 CR-39 探测器的厚度分别约为 5mm 和 0.783mm。利用 SRIM-2013 程序可以计算出到达每个靶上表面的能量。实验中第 5 个靶上表面的束流能量为 736 *A*MeV。

束流照射后，CR-39 探测器在温度为 70℃的 7mol/L 的 NaOH 水溶液中蚀刻约 15 小时。蚀刻过程中，束流离子及其碎片在 CR-39 探测器中产生的径迹会在探测器的上下面以锥形坑的形式呈现出来。蚀刻完成后，利用 HSP-1000 高速成像显微镜对 CR-39 上下表面进行扫描得到蚀刻径迹图像，然后经过 PitFit 径迹分析软件自动拟合可得到各个蚀刻径迹的截面面积和位置坐标等几何信息[37]。在自动拟合完成后是人工手动检查过程，执行该过程可以纠正软件错误识别的个别径迹，包括探测器本底杂质气泡和径迹重叠等情况，进而确保最终的径迹识别效率接近 100%。

弹核碎片的电荷数 Z 可通过蚀刻径迹截面的面积分布来识别，但由于受到 CR-39 探测器电荷分辨率的限制，电荷数 Z=1-4 的弹核碎片无法被记录。图 2 为通过光学显微镜观察到的弹核 ^{28}Si 及其碎片在 CR-39 中的径迹，其中 A 为弹核 ^{28}Si 的径迹，B 和 C 为弹核碎片的径迹。对于电荷识别、径迹匹配和径迹重建等

步骤，具体介绍可详见文献[10, 29-31, 38]。

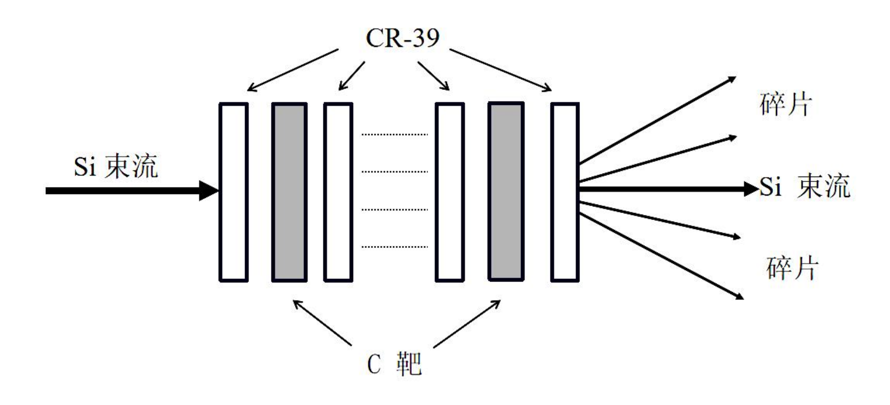


图 1 束流照射结构示意图

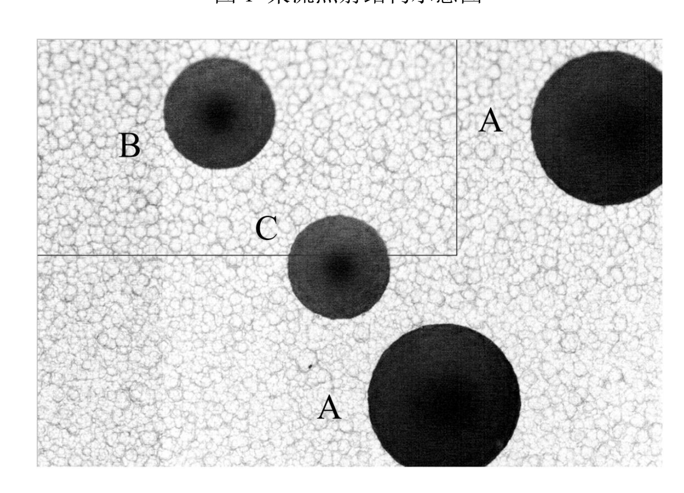


图 2 CR-39 上带电粒子的径迹

3. 结果与讨论

每个弹核碎片的发射角为两个方向矢量的夹角，这两个方向矢量分别是弹核硅的方向矢量和弹核碎片的方向矢量，分别用 $\vec{v}_p$ 和 $\vec{v}_f$ 表示。$\vec{v}_p$ 可通过靶前 CR-39 探测器上下表面入射和出射的径迹坐标来得出，$\vec{v}_f$ 可通过靶后 CR-39 探测器上下表面入射和出射的径迹坐标来得出。弹核碎片发射角的确定如图 3 所示，其中靶的厚度只有几毫米，因此在大多数情况下，弹核和靶之间只会发生极少量的反应。假设发射碎片在到达探测器之前不会发生明显的散射，实验室坐标系中各弹核碎片的发射角可根据以下公式得出:

$$\theta = \arccos(\vec{v}_p \cdot \vec{v}_f) \tag{1}$$

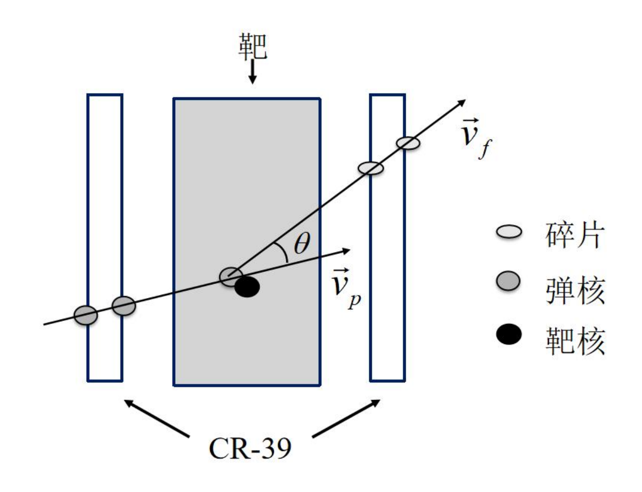


图 3 弹核碎片发射角确定示意图

在同一个显微镜框架内，径迹尺寸和位置坐标的测量精度可达到 0.1μm。总的位置精度则是由显微镜的移动平台决定的。显微镜系统在 X-Y 坐标平面上的位置不确定度 σ_p 约为 3μm。Z 轴上的位置不确定度 σ_z 约为 8μm，取决于靶和探测器放置的位置以及探测器的厚度。采用四组拟合方法进行径迹重建，其角度不确定度为[27]：

$$\sigma(\theta)=\frac{\sqrt{\sigma_z^2\sin^2\theta+2\sigma_p^2\cos^2\theta}}{2h} \tag{2}$$

式中 θ 为拟合直线的极角。当探测器厚度 h≈780μm 时，在角度 θ 达到 8°时，其角度不确定度 $\sigma(\theta)$≈0.16°。因此，在弹核碎片发射角和束流粒子散射角的测量误差中，可忽略这种角度不确定性。本文中的误差均为统计误差。

图 4 给出了能量在 736 *A*MeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应后硅粒子散射角和弹核碎片发射角分布。实验发现，弹核碎片发射角分布宽度大于 ^{28}Si 束流粒子的散射角，大多数弹核碎片发射角分布在 2.0 度以内。

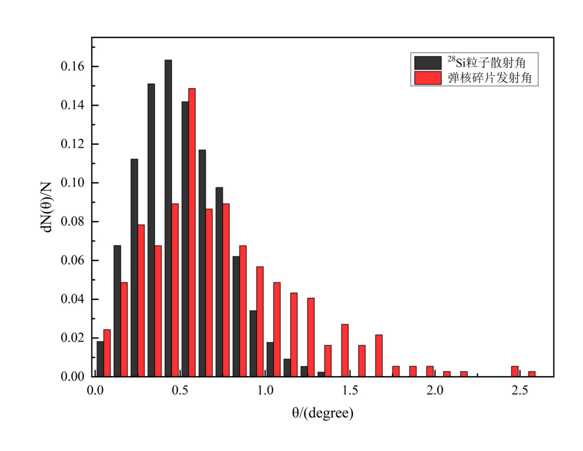


图 4 736 *A*MeV ^{28}Si 与 C 靶反应 ^{28}Si 粒子散射角和弹核碎片发射角分布

图 5 给出了本次实验能量在 736 *A*MeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应不同电荷碎片发射角分布。图 6 为之前实验组在能量为 800 *A*MeV 和 775 *A*MeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应不同电荷碎片发射角分布[16,26]。从图 5 和图 6 可以看出，大多数弹核碎片发射角小于 2.0 度，很少有发射角大于 2.0 度。随着弹核碎片电荷数 *Z* 的减小，角分布逐渐变宽。大多数角分布可以用单一的高斯分布很好地拟合，个别弹核碎片角分布不能用高斯分布拟合，这是因为统计数量较少导致的。

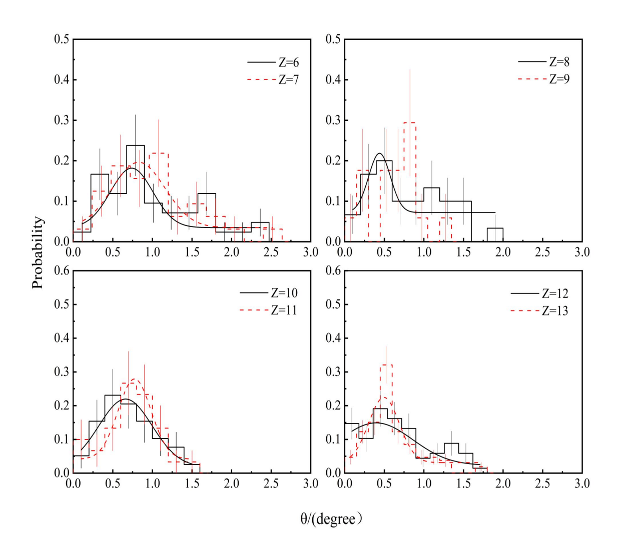


图 5 736 *A*MeV ^{28}Si 与 C 靶反应弹核碎片发射角分布

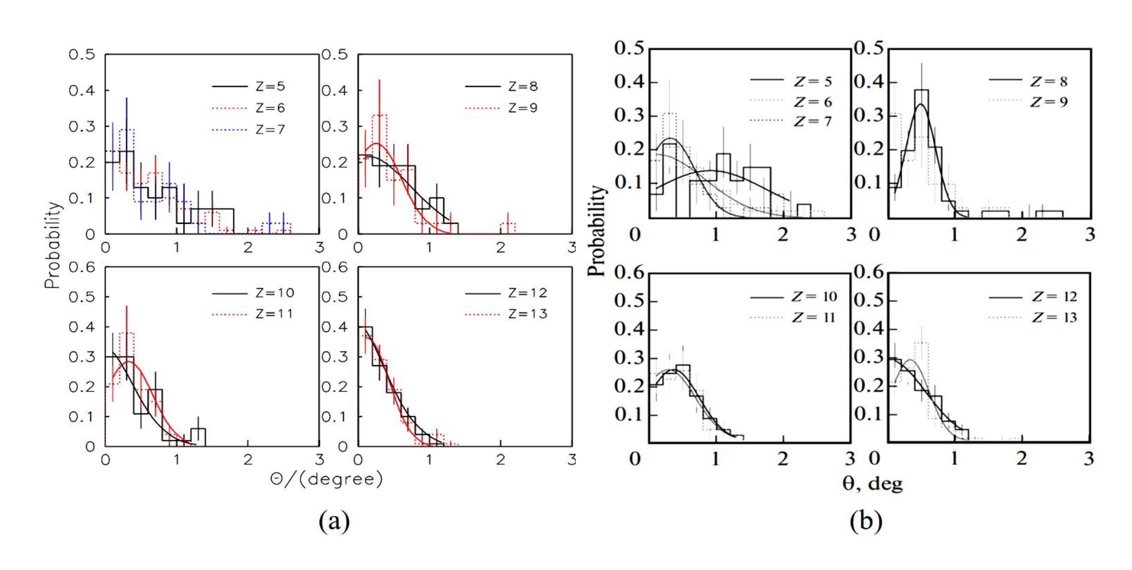


图 6 800 *A*MeV (a)和 775 *A*MeV (b) ^{28}Si 与 C 靶反应弹核碎片发射角分布[16,26]

图 7 给出了本次实验能量在 736 *A*MeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应弹核碎片发射角平均值随碎片电荷数 *Z* 的变化关系，并与之前实验组在能量为 800 *A*MeV 和 775 *A*MeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应弹核碎片发射角平均值随碎片电荷数 *Z* 的变化关系[16,26]进行比较。从图 7 中可以看出，弹核碎片发射角平均值范围大致在 1.0 度以内，发射角平均值随碎片电荷数 *Z* 的增加总体上呈现减小的趋势。本次实验中，电荷数 *Z*=9 的弹核碎片因统计数量较少导致发射角平均值相对较低。

根据反应体-旁观体模型[39,40]，由于电荷数 Z 较大的弹核碎片产生于 ^{28}Si 与靶核的边缘碰撞，弹核和靶核之间发生的能量传递较少，给予弹核碎片的激发能较小，所以发射角较小；而电荷数 Z 较小的弹核碎片产生于 ^{28}Si 与靶核的半中心碰撞，弹核和靶核之间存在较大的能量传递，且这些能量传递随着碰撞中心重叠区域的增加而增加，所以发射角较大。因而弹核碎片发射角分布的平均值和宽度随碎片电荷数 Z 的增加而减小。

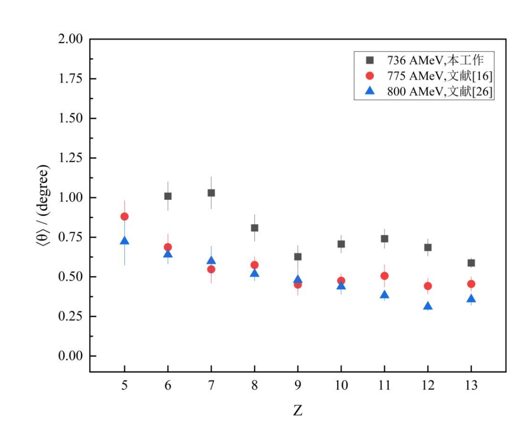


图 7 能量为 736、775 和 800 AMeV ^{28}Si 与 C 靶反应弹核碎片发射角平均值随碎片电荷数 Z 的变化关系

4. 结论

本实验测量了能量在 736 AMeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应产生的弹核碎片发射角分布，并与能量在 800 AMeV 和 775 AMeV 下 ^{28}Si 与 C 靶反应产生的弹核碎片发射角分布进行比较。弹核碎片发射角的角分布宽度和平均值大于 ^{28}Si 束流粒子的散射角。不同电荷数 Z 的弹核碎片发射角角分布平均值和宽度随碎片电荷数 Z 的增加总体呈现减小的趋势。

参考文献：

[1] GAO Xin, YANG Shengsheng, NIU Xiaole, et al. Space radiation environments and dosimetry[J]. Vacuum & Cryogenics，2007, 13(1): 41-47 (in Chinese).

(高欣，杨生胜，牛小乐，王云飞. 空间辐射环境与测量[J]. 真空与低温，2007，13(1)：41-47.)

[2] ZEITLIN C， GUETERSLOH S， HEILBRONN L， et al. Nuclear fragmentation database for GCR transport code development[J]. Advances in Space Research, 2010, 46:728-734. doi: 10.1016/j.asr.2010.04.035

[3] ZHOU Dazhuang, WANG Shijin, ZHANG Binquan, et al. Radiation in near earth orbit and radiation risk for astronauts[J]. Manned Spaceflight，2013，19(4)：81-89 (in Chinese). http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_zrht201304013.aspx

(周大庄，王世金，张斌全，等. 近地空间辐射和航天员辐射风险[J]. 载人航天，2013，19(4)：81-89.

http://d.wanfangdata.com.cn/Periodical_zrht201304013.aspx)

[4] ZEITLIN C, FUKUMURA A, GUETERSLOH S B, et al. Fragmentation cross sections of ^{28}Si at beam energies from 290 A to 1200 A Mev[J]. Nucl Phys A, 2007, 784: 341-367. doi: 10.1016/j.nuclphysa.2006.10.088

[5] BRECHTMANN C, HEINRICH W. Fragmentation cross sections of ^{28}Si at 14.5GeV/nucleon[J]. Phys Rev C，1989，39(6)：2222-2226. doi: 10.1103/PhysRevC.39.2222

[6] CECCHINI S，CHIARUSI T，GIACOMELLI G ， et al. Fragmentation cross sections of Fe^{26+}, Si^{14+} and C^{6+} ions of 0.3–10 A GeV on polyethylene，CR39 and aluminum targets[J]. Nucl Phys A, 2008, 807: 206-213. doi: 10.1016/j.nuclphysa.2008.03.017

[7] FLESCH F，IANCU G，HEINRICH W， et al. Projectile fragmentation of silicon ions at 490 A MeV[J]. Rad Meas., 2001, 34：237-240. doi: 10.1016/S1350-4487(01)00158-5

[8] GUPTA R， KUMAR A. Fragmentation cross-section of 600A MeV Si^{14+} ions in thick polyethylene target[J]. The European Physical Journal A, 2013, 49: 98. doi: 10.1140/epja/i2013-13098-3

[9] LI J S, ZHANG D H, CHENG J X, et al. Fragmentation cross sections of 788 A MeV ^{28}Si on carbon and polyethylene targets[J]. Chinese Journal of Physics, 2016, 54: 314-317. doi: 10.1016/j.cjph.2016.05.003

[10] LI J S, DANG Y H, ZHANG D H, et al. Charge-Changing cross section of 736 A MeV ^{28}Si on carbon targets[J]. Chin Phys Lett., 2017, 34:102501. doi: 10.1088/0256-307X/34/10/102501

[11] TOGO V，BALESTRA S，CECCHINI S，et al. Fragmentation studies of high-energy ions using CR-39 nuclear track detectors[J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 2007, 580: 58-61. doi: 10.1016/j.nima.2007.05.017

[12] YAMAGUCHI T，FUKUDA S，FAN G W， et al. Energy-dependent charge-changing cross sections and proton distribution of ^{28}Si[J]. Phys Rev C, 2010, 82: 014609. doi: 10.1103/PhysRevC.82.014609

[13] WEBBER W R, KISH J C, SCHRIER D A， Total charge and mass changing cross sections of relativistic nuclei in hydrogen, helium, and carbon targets[J]. Phys Rev C, 1990, 41: 520-532. doi: 10.1103/PhysRevC.41.520

[14] WEBBER W R， KISH J C， SCHRIER D A. Individual charge changing fragmentation cross sections of relativistic nuclei in hydrogen, helium, and carbon targets[J]. Phys Rev C, 1990, 41: 533-546. doi: 10.1103/PhysRevC.41.533

[15] PRICE P B, HE Y D, Behavior of nuclear projectile fragments produced in collisions of 14.5 A GeV ^{28}Si with Pb and Cu targets[J]. Phys Rev C, 1991, 43: 835-848. doi: 10.1103/PhysRevC.43.835

[16] ZHANG D H, LI J S, KODAIRA S, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of silion on carbon and polyethylene targets at 775 A MeV[J]. J Surf Investig-X-Ra, 2016, 10: 820-825. doi: 10.1134/S1027451016040261

[17] LI G S, SU J, SUN B H, et al. New measurement of the elemental fragmentation cross sections of 218 MeV/nucleon ^{28}Si on a carbon target[J]. Phys Rev C, 2023, 107: 024609. doi:10.1103/PhysRevC.107.024609.

[18] WILSON J W, SHINN J L, TOWNSEND L W, et al. NUCFRG2: a semiempirical nuclear fragmentation model[J]. Nucl Instr

Meth B, 1994, 94: 95-102. doi: 10.1016/0168-583X(94)95662-6

[19] SATO T, SIHVER L, IWASE H, et al. Simulations of an accelerator-based shielding experiment using the particle and heavy-ion transport code system PHITS[J]. Advances in Space Research, 2005, 35: 208-213. doi:10.1016/j.asr.2005.01.041

[20] BRADT H L, PETERS B. The heavy nuclei of the primary cosmic radiation[J]. Physical Review, 1950, 77(1): 54-70. doi: 10.1103/PhysRev.77.54

[21] SUMMERER K. Improved empirical parametrization of fragmentation cross sections[J]. Physical Review C, 2012, 86: 014601. doi: 10.1103/PhysRevC.86.014601

[22] ZHANG X H. Modified EPAX2 parameterization for estimating the fragment cross sections at intermediate energies[J]. Nuclear Physics A, 2013, 915:59-69. doi: 10.1016/j.nuclphysa.2013.06.013

[23] MEI B. Improve empirical parameterization for projectile fragmentation cross sections[J]. Physical Review C, 2017, 95: 034608. doi: 10.1103/PhysRevC.95.034608

[24] SINGH M K, SOMA A K, PATHAK R, et al. Emission characteristics of the projectile fragments at relativistic energy[J]. Indian J Phys, 2013, 87(1): 59-69. doi: 10.1007/s12648-012-0157-4

[25] ZEITLIN C, MILLER J, GUETERSLOH S, et al. Fragmentation of ^{14}N, ^{16}O, ^{20}Ne, and ^{24}Mg nuclei at 290 to 1000 MeV/nucleon[J]. Physical Review C, 2011, 83(3): 034909. doi: 10.1103/PhysRevC.83.034909

[26] FENG Z, AO H H, SUN Y Q, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of silicon on carbon and polyethylene targets at 800 A MeV[J]. Physics Procedia, 2015, 80: 36-40. doi: 10.1016/j.phpro.2015.11.085

[27] GIACOMELLI M, SKVARC J, ILIC R, et al. The measurement of the fragment emission angles in the reactions of <135 MeV/u ^{12}C and ^{16}O in tissue equivalent targets[J]. Radiat Meas, 2003, 36: 329-334. doi: 10.1016/S1350-4487(03)00146-X

[28] SIHVER L, GIACOMELLI M, OTA S, et al.Projectile fragment emission angles in fragmentation reactions of light heavy ions in the energy region <200 MeV/nucleon: Experimental study[J]. Radiat Meas, 2013, 48: 73-81. doi: 10.1016/j.radmeas.2012.08.006

[29] ZHANG D H, WANG L C, LI Y J, et al. Fragmentation ^{56}Fe on C, Al and CH_2 targets at 471 A MeV[J]. Nucl Instr Meth B, 2013, 315: 99-104. doi: 10.1016/j.nimb.2013.05.071

[30] LI Y J, ZHANG D H, YAN S W, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of ^{56}Fe on C, Al and CH_2 targets at 471 A MeV[J]. Chin Phys C, 2014, 38: 014001. doi: 10.1088/1674-1137/38/1/014001

[31] ZHANG D H, GOU C W, LI J S, et al. Fragmentation of 400 A MeV carbon ions on Cu target[J]. Radiat Meas, 2019, 126: 106125. doi: 10.1016/j.radmeas.2019.106125

[32] WANG L H, HUO L D, ZHU J H, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of ^{56}Fe on Al, C, and CH_2 targets[J]. Nucl Sci Tech, 2019, 30: 186-197. doi: 10.1007/s41365-019-0704-1

[33] ZHANG D H, SHI R, LI J S, et al. Projectile fragment emission in the fragmentation of ^{20}Ne on C, Al and CH_2 targets at 400 MeV/u[J]. Nucl Instr Meth B, 2018, 435: 174-179. doi: 10.1016/j.nimb.2018.05.045

[34] GIACOMELLI M, SIHVER L, SKVARC J, et al. Projectile like fragment emission angles in fragmentation reactions of light heavy ions in the energy region <200 MeV/nucleon: modeling and simulations[J]. Phys Rev C, 2004, 69(6): 064601. doi: 10.1103/PhysRevC.69.064601

[35] SATO T, IWAMOTO Y, HASHIMOTO S, et al. Features of particle and heavy ion transport code system (PHITS) version 3.02[J]. J Nucl Sci Technol, 2018, 55: 684-690. doi: 10.1080/00223131.2017.1419890

[36] QUAZI MUHAMMAD RASHED NIZAM, YOSHIDA K, SAKAMOTO T, et al. High-precision angular measurement of ^{12}C ion interaction using a new imaging method with a CR-39 detector in the energy range below 100 MeV/nucleon[J]. Radiation Measurements, 2020, 131: 106225. doi: 10.1016/j.radmeas.2019.106225

[37] OTA S, KODAIRA S, YASUDA N, et al. Tracking method for the measurement of projectile charge changing cross-section using CR-39 detector with a high speed imaging microscope[J]. Radiat Meas, 2008, 43: S195-S198. doi: 10.1016/j.radmeas.2008.04.058

[38] CHENG J X, ZHANG D H, YAN S W, et al. The fragmentation of ^{20}Ne at 400 A MeV[J]. Chin Phys C, 2012, 36: 37-42. doi: 10.1088/1674-1137/36/1/006

[39] BOWMAN J D, SWIATECKI W J, TSANG C F. Abrasion and ablation of heavy ions. Lawrence Berkeley Laboratory Report LBL-2908, 1973. http://escholarship.org/uc/item/8nm3b276

[40] GOSSET J, GUTBROD H H, MEYER W G, et al. Central collisions of relativistic heavy ions[J]. Phys Rev C, 1977, 16(2): 629-657. doi: 10.1103/PhysRevC.16.629

Investigation of the Emission Angle Distribution Measurement in the Fragmentation of ^{28}Si on C Target at 736 *A*MeV*

DANG Yinghua[1,2] , LI Junsheng[1,†], KANG Jingxiao[1], WANG Ying[1],

YANG Xiaolu[1], LIU Xiaoyu[1], LI Rong[1], ZHANG Donghai[1,†]

(1. Institute of Modern Physics, Shanxi Normal University, Taiyuan 030031, China;

2. Upgrading office of Modern College of Humanities and Sciences of Shanxi Normal University, Linfen 041000, China）

Abstract： The angular distributions of projectile fragments produced in fragmentation of ^{28}Si on C target are studied via CR-39 detectors, HSP-1000 high speed imaging microscope and PitFit track analysis software. By performing beam irradiation, chemical etching, track reconstruction and other experimental steps, the latest experimental results of the emission angle distributions of projectile fragments produced in fragmentation of ^{28}Si on C target at 736 *A*MeV are given, and compared with the emission angle distributions of projectile fragments produced in fragmentation of ^{28}Si on C target at 800 *A*MeV and 775 *A*MeV. The result shows that the angular distribution width and average value of the emission angle of projectile fragments are larger than the scattering angle of ^{28}Si beam particles. Most of the emission angles are less than 2.0 degrees, and few of them are larger than 2.0 degrees. The average emission angle of projectile fragments with different charge number *Z* is within 1.0 degree, and the average and width of the angular distribution tend to decrease with the increase of the fragment charge number.

Key words: heavy ion collision; projectile fragmentation; emission angle; angular distribution

---

Received date: **Revised date:**

Foundation item: National Nature Science Foundation of China under Grant (11075100, 11347198, 11565001);

Shanxi Provincial Natural Foundation of Shanxi Province under Grant (2011011001-2, 202203021212396)

1) E-mail: sxdangyh@163.com

[†]**Corresponding author**: LI Junsheng, E-mail: lijs@sxnu.edu.cn

ZHANG Donghai：zhangdh@sxnu.edu.cn